

Семенов А.О.

Вінницький національний технічний університет

МОДЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНОЇ ДИНАМІКИ РАДІОТЕХНІЧНИХ ПРИСТРОЇВ НА ОСНОВІ ТРАНЗИСТОРНИХ СТРУКТУР ІЗ ВІД'ЄМНИМ ОПОРОМ

У роботі наведено результати теоретичних досліджень та математичного моделювання радіотехнічного пристрою формування сигналів на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором. Запропоновано нове рівняння апроксимації статичної вольт-амперної характеристики біполярної транзисторної структури з від'ємним опором. Розглянуто просту аналогову схему радіотехнічного пристрою для формування сигналів. Запропоновано математичну модель пристрою. Досліджено динаміку періодичних коливань у режимах підсилення, ділення частоти й амплітудної модуляції вхідного сигналу. Отримано фазові портрети, фігури Ліссажу, часові діаграми та амплітудо-частотні спектри вхідної та вихідної напруги.

Ключові слова: транзисторна структура, від'ємний опір, математична модель, електричні коливання, фазовий портрет.

Постановка проблеми. Для побудови радіотехнічних пристроїв використовуються напівпровідникові прилади з від'ємним диференціальним опором та їх транзисторні схемотехнічні аналоги [1; 2]. Це зумовлено тим, що такі пристрої мають нелінійну вольт-амперну характеристику складної форми [3]. На практиці радіотехнічні пристрої з від'ємним опором мають складну неперіодичну і хаотичну поведінку [4]. Під час подання зовнішнього синусоїдального сигналу в таких пристроях виникає складна динаміка коливань, спостерігаються біфуркації, що зумовлюють подвоєння та потроєння періодів коливань [4; 5]. Тому дослідження динаміки електричних коливань у радіотехнічних пристроях із від'ємним опором є актуальною науково-технічною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На практиці для побудови радіотехнічних пристроїв формування аналогових сигналів застосовують транзисторні структури з вольт-амперними характеристиками (далі – ВАХ) Λ -, N- або S-типу [1–3], на основі диференціальних каскадів [6, с. 390], або каскадних схем [7]. Динаміка електричних коливань і режими роботи таких радіотехнічних пристроїв не залежать від типу транзисторів. Динаміка коливань і режими роботи цих пристроїв визначаються нелінійними властивостями статичних ВАХ і динамічними властивостями коливальної системи [4; 5]. Більшість результатів досліджень радіотехнічних пристроїв

на основі транзисторних структур із від'ємним опором отримані для випадку періодичної динаміки електричних коливань осциляторного або релаксаційного типів [1–3; 7]. Нелінійним і хаотичним режимам роботи таких пристроїв приділено менше уваги [4–6]. Тому розвиток теорії нелінійних властивостей і режимів роботи радіотехнічних пристроїв на основі транзисторних структур із від'ємним опором із різними геометричними формами статичних ВАХ є невирішеною задачею.

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження нелінійної динаміки електричних коливань у неавтономному радіотехнічному пристрої формування сигналів на основі транзисторної структури з від'ємним опором, що має ВАХ Λ -типу з вигином догори. Такі форми статичних ВАХ характерні для окремих біполярних транзисторних структур із від'ємним опором [3, с. 102]. Для досягнення поставленої мети в статті потрібно вирішити такі задачі: 1) запропонувати рівняння апроксимації статичних ВАХ транзисторної структури Λ -типу; 2) обґрунтувати математичну модель радіотехнічного пристрою на основі транзисторної структури з від'ємним опором; 3) отримати результати математичного моделювання; 4) зробити висновки щодо проведеного дослідження.

Виклад основного матеріалу дослідження. Еквівалентна схема радіотехнічного пристрою

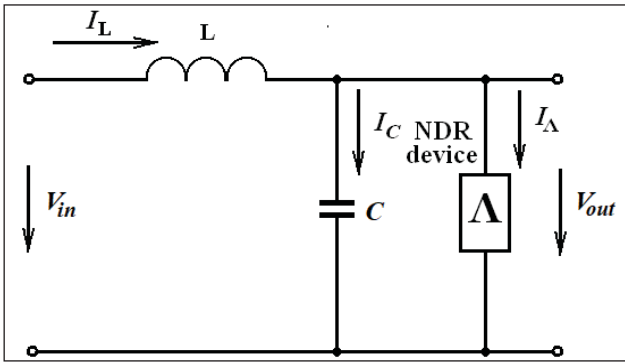


Рис. 1. Еквівалентна схема радіотехнічного пристрою на основі транзисторної структури з від’ємним опором із ВАХ Λ -типу [4, с. 2]

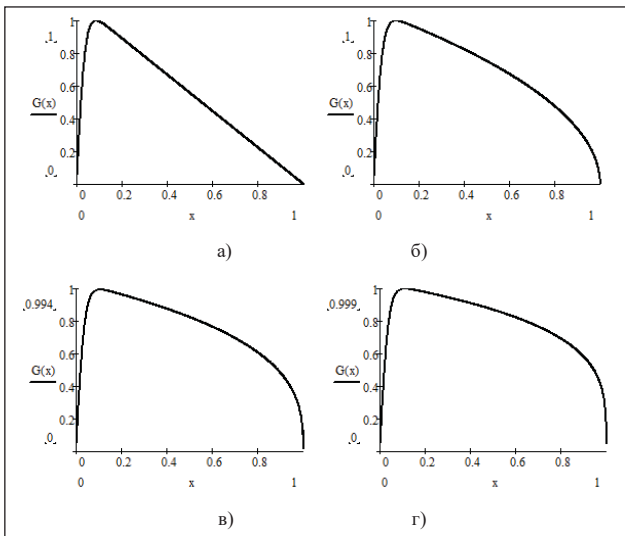


Рис. 2. Графік різних форм ВАХ із рівняння (1) за: а) $n = 1$; б) $n = 2$; в) $n = 3$; г) $n = 4$

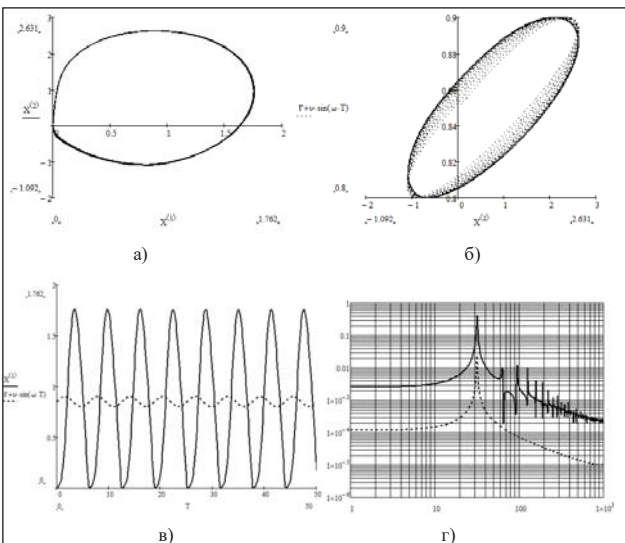


Рис. 3. Результати математичного моделювання режиму підсилення: а) фазовий портрет; б) фігура Ліссажу; в) часова діаграма нормованих вхідної та вихідної напруги; г) амплітудо-частотний спектр нормованих вхідної та вихідної напруг

на основі транзисторної структури з від’ємним опором із ВАХ Λ -типу подана на рис. 1 [4, с. 2]. Основними елементами схеми є двохелектродна транзисторна структура з від’ємним опором та послідовний коливальний контур [4, с. 2; 5, с. 5225].

Нелінійна динаміка коливань у радіотехнічному пристрої залежить від геометричної форми ВАХ транзисторної структури з від’ємним опором. Для апроксимації статичних ВАХ застосовують рівняння з використанням функції гіперболічного тангенса. У роботі [3, с. 167; 3, с. 206] автором запропоновано такі рівняння у фізичних величинах (напругах і струмах). У цій роботі автором пропонується рівняння апроксимації ВАХ у безрозмірних змінних, які нормовані до напруг і струмів геометричних точок реальної ВАХ вигнутих догори [3, с. 102] біполярних транзисторних структур із від’ємним опором:

$$G(x) = 2,029 \cdot 10^{-3} x + M \sqrt[n]{1 - 1,002x} \tanh\left(\frac{25x}{1 - 1,002x}\right), \quad (1)$$

де n – ціле додатне число ($n \neq 0$); M – масштабний коефіцієнт графіка нормованої ВАХ. За вигнутої догори ВАХ користуються рівнянням (1): якщо $n = 1$, тоді $M = 1,114$ (рис. 1, а); якщо $n = 2$, тоді $M = 1,062$ (рис. 1, б); якщо $n = 3$, тоді $M = 1,037$ (рис. 1, в); якщо $n = 4$, тоді $M = 1,033$ (рис. 1, г).

Система рівнянь Кірхгофа для електричного кола на рис. 1 має такий вигляд [4, с. 2]:

$$\begin{cases} \frac{dv_C}{dt} = \frac{1}{C}(i_L - i_{NDR}) = \frac{1}{C}[i_L - G(v_C)], \\ \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}(V_{IN} - v_C). \end{cases} \quad (2)$$

Де вхідна напруга [4, с. 2; 5, с. 5225]:

$$V_{IN} = E_{DC} + E_A \sin(\omega_{IN} t), \quad (3)$$

E_{DC} – це напруга зміщення, для встановлення робочої точки на спадній ділянці ВАХ; E_A , ω_{IN} – амплітуда та кругова частота зовнішньої синусоїдальної дії відповідно.

У нормованих змінних система рівнянь (2) має такий вигляд [4, с. 2]:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = \frac{1}{\varepsilon}[x_2 - G(x_1)], \\ \frac{dx_2}{dt} = \varepsilon[\Gamma + v \cdot \sin(\omega t) - x_2]. \end{cases} \quad (4)$$

Де рівняння нормованих змінних і коефіцієнтів системи мають вигляд [4, с. 2]:

$$x_1 = \frac{v_C}{E_M}, \quad x_2 = \frac{i_L}{I_M}, \quad T = \frac{t}{\sqrt{LC}}, \quad \omega = \omega_{IN} \sqrt{LC}, \quad (5)$$

$$\Gamma = \frac{E_{DC}}{E_M}, \quad v = \frac{E_A}{E_M}, \quad \varepsilon = \frac{E_M/I_M}{\sqrt{L/C}},$$

де E_M , I_M – координати точки максимуму струму та напруги на графіку ВАХ транзисторної структури з від’ємним опором [8].

У роботі автором отримано результати математичного моделювання неавтономного радіотехнічного пристрою на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором у різних режимах роботи. Як варіант за основу обрано форму ВАХ транзисторної структури за $n=3$ (рис. 2, в). Математичне моделювання пристрою здійснено для таких режимів:

1) режим підсилення за коефіцієнтів (5) динамічної системи (4): $\varepsilon = 2$, $\Gamma = 0,85$, $\nu = 0,05$, $\omega = 1,0$. Результати моделювання – на рис. 3;

2) режим ділення частоти на 2 за коефіцієнтів (5) динамічної системи (4): $\varepsilon = 2$, $\Gamma = 0,2$, $\nu = 0,2$, $\omega = 2,0$. Результати моделювання – на рис. 4;

3) режим ділення частоти на 3 за коефіцієнтів (5) динамічної системи (4): $\varepsilon = 2$, $\Gamma = 0,14$,

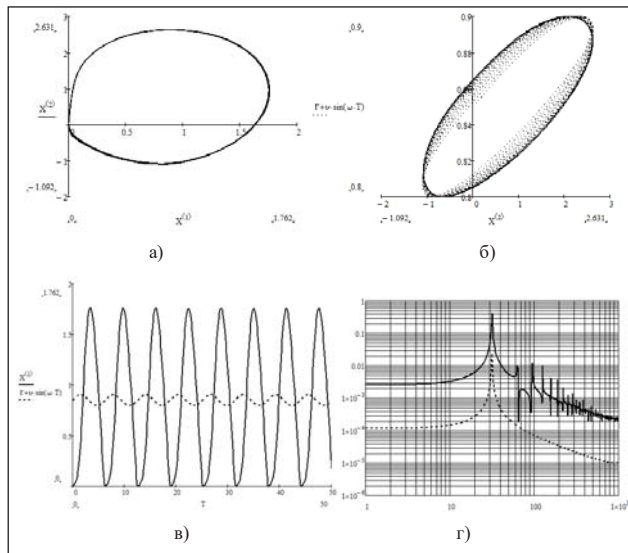


Рис. 4. Результати математичного моделювання режиму ділення частоти на 2: а) фазовий портрет; б) фігура Лиссажу; в) часова діаграма нормованих вхідної та вихідної напруги; г) амплітудо-частотний спектр нормованих вхідної та вихідної напруги

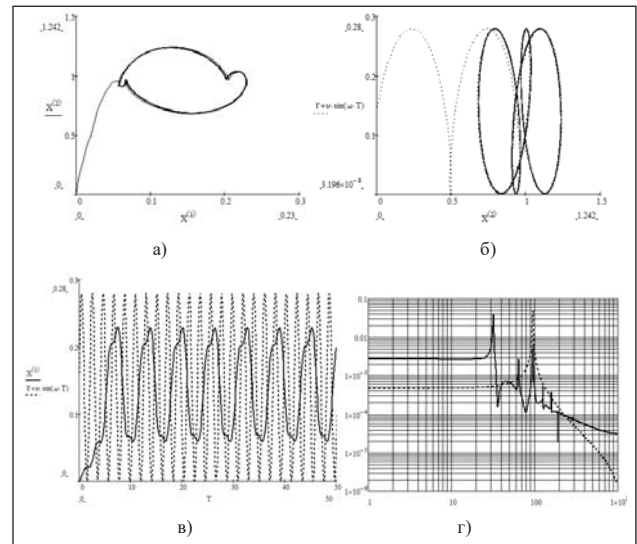


Рис. 5. Результати математичного моделювання режиму ділення частоти на 3: а) фазовий портрет; б) фігура Лиссажу; в) часова діаграма нормованих вхідної та вихідної напруги; г) амплітудо-частотний спектр нормованих вхідної та вихідної напруги

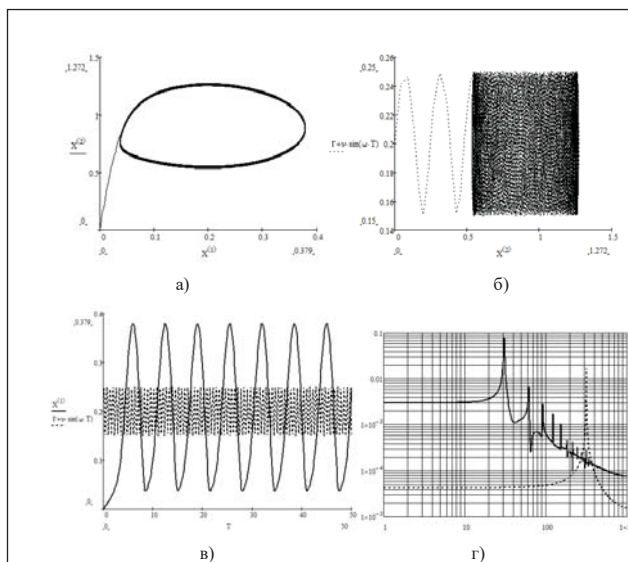


Рис. 6. Результати математичного моделювання режиму ділення частоти на 10: а) фазовий портрет; б) фігура Лиссажу; в) часова діаграма нормованих вхідної та вихідної напруги; г) амплітудо-частотний спектр нормованих вхідної та вихідної напруги

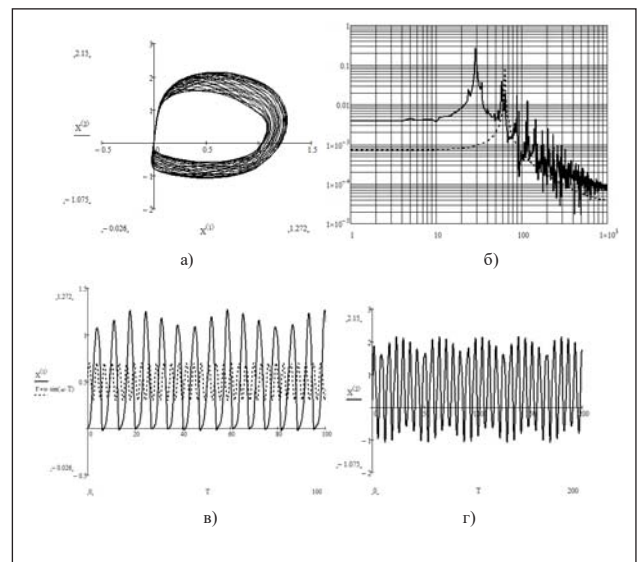


Рис. 7. Результати математичного моделювання режиму амплітудної модуляції сигналу: а) фазовий портрет; б) амплітудо-частотний спектр нормованих вхідної та вихідної напруги; в) часова діаграма нормованих вхідної та вихідної напруги; г) часова діаграма нормованого струму індуктивності

$\nu = 0,14$, $\omega = 3,0$. Результати моделювання – на рис. 5;

4) режим ділення частоти на 10 за коефіцієнтів (5) динамічної системи (4): $\varepsilon = 2$, $\Gamma = 0,2$, $\nu = 0,05$, $\omega = 10,0$. Результати моделювання – на рис. 6;

5) режим амплітудної модуляції за коефіцієнтів (5) динамічної системи (4): $\varepsilon = 2$, $\Gamma = 0,5$, $\nu = 0,2$, $\omega = 2,0$. Результати моделювання – на рис. 7.

Висновки. У роботі отримано результати теоретичних досліджень і математичного моделювання неавтономного радіотехнічного пристрою формування сигналів на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором. Досліджено динаміку електричних коливань у режимах підсилення, ділення частоти й амплітудної моду-

ляції сигналу. Режимими роботи та параметрами електричних коливань можна ефективно керувати шляхом зміни положення робочої точки на спадній ділянці статичної ВАХ, а також величиною амплітуди та частоти вхідного синусоїдального сигналу. Модельні дослідження показали стійку роботу радіотехнічного пристрою в зазначених режимах. Перевагами радіотехнічних пристроїв формування сигналів на основі транзисторних структур із від'ємним опором є високий рівень вихідного сигналу порівняно із класичними. Як недоліки досліджених радіотехнічних пристроїв варто зазначити обмежену нелінійну динаміку транзисторних структур із ВАХ Λ -типу з вигином догори порівняно із класичною формою ВАХ Λ -типу з вигином донизу.

Список літератури:

1. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Барабан С.В. Радіовимірювальні перетворювачі на основі транзисторних структур із від'ємним опором для неруйнівного теплового контролю. Вінниця: ВНТУ, 2015. 212 с. ISBN 978-966-641-599-1.
2. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Савицький А.Ю. Радіовимірювальні перетворювачі вологості на основі МДН-структур. Вінниця: ВНТУ, 2016. 152 с. ISBN 978-966-641-649-3.
3. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Семенов А.О., Коваль К.О. Функціональні вузли радіовимірювальних приладів на основі реактивних властивостей транзисторних структур із від'ємним опором. Вінниця: ВНТУ, 2011. 336 с. ISBN 978-966-641-405-5.
4. Núñez Juan, Avedillo María J., José M. Quintana. Bifurcation Diagrams in MOS-NDR Frequency Divider Circuits. 19th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS), 9–12 Dec. 2012, Seville, Spain. P. 1–4. DOI: 10.1109/ICECS.2012.6463558.
5. Kwang-Jow Gan, Kuan-Yu Chun, Wen-Kuan Yeh, Yaw-Hwang Chen, Wein-So Wang. Design of Dynamic Frequency Divider using Negative Differential Resistance Circuit. International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication. Vol. 3. Issue 8. August 2015. P. 5224–5228. DOI: 10.17762/ijritcc2321-8169.150833.
6. Kennedy Michael Peter, Li Zhida, Huang Zhen. Programmable analog frequency divider based on ρ -switching. Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE. Vol. 4. № 4. 1 Oct. 2013. P. 389–399. DOI: 10.1587/nolta.4.389.
7. Новиков С.Г., Гурин Н.Т., Беринцев А.В., Родионов В.А., Штанько А.А. Полупроводниковые приборы с отрицательным сопротивлением на передаточной вольт-амперной характеристике. Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 6. С. 59–68.
8. Семенов А.О., Осадчук О.В. Генератор детермінованого хаосу з інерційною нелінійністю на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2017. № 6. С. 147–152.

МОДЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ ТРАНЗИСТОРНЫХ СТРУКТУР С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

В работе приведены результаты теоретических исследований и математического моделирования радиотехнического устройства формирования сигналов на основе биполярной транзисторной структуры с отрицательным сопротивлением. Предложено новое уравнение аппроксимации статической вольт-амперной характеристики биполярной транзисторной структуры с отрицательным сопротивлением. Рассмотрена простая аналоговая схема радиотехнического устройства для формирования сигналов. Предложена математическая модель устройства. Исследована динамика периодических колебаний в режимах усиления, деления частоты и амплитудной модуляции входного сигнала. Получены фазовые портреты, фигуры Лиссажу, временные диаграммы и амплитудно-частотные спектры входного и выходного напряжения.

Ключевые слова: транзисторная структура, отрицательное сопротивление, математическая модель, электрические колебания, фазовый портрет.

MODEL RESEARCH OF THE NON-LINEAR DYNAMICS OF RADIO-ENGINEERING DEVICES BASED ON A TRANSISTOR STRUCTURE WITH NEGATIVE RESISTANCE

The paper presents results obtained after theoretical investigating and mathematical modelling a radio-engineering device for forming signals based on a bipolar transistor structure with negative resistance. A new equation for approximating the static I–V curve of the bipolar transistor structure with negative resistance was proposed. A simple analogue circuit of the radio-engineering device for forming signals was considered. A mathematical model of the device was suggested. Dynamics of the periodic oscillation was examined in modes of amplification, frequency division, and input signal amplitude modulation. Phase portraits, Lissajous curves, time diagrams, amplitude-frequency spectra of input and output voltages were obtained.

Key words: *transistor structure, negative resistance, mathematical model, electrical oscillation, phase portrait.*